

지하계단 화재에서 유동에 대한 실험연구

정진용[†], 홍기배^{*}, 이재하^{**}, 유홍선^{**}

충주대학교 열공학과 Post Doc., ^{*}충주대학교 열공학과, ^{**}중앙대학교 기계공학과

An Experimental Study of Flow Behaviour in Underground Stairway Fire

Jin Yong Jeong[†], Gi Bae Hong^{*}, Jae Ha Lee^{**}, Hong Sun Ryou^{**}

Department of Thermal Engineering Post Doc., Chungju National University, Chungju 380-702, Korea

^{*}Department of Thermal Engineering, Chungju National University, Chungju 380-702, Korea

^{**}Department of Mechanical Engineering, Chung-Ang University, Seoul 156-756, Korea

(Received February 19, 2003 revision received August 21, 2003)

ABSTRACT: Reduced-scale experimental study was carried out on the heat flow behavior which flows under the sloped ceiling in underground fire. Temperature and flow velocity were measured to characterize the ceiling jet along the sloped stairway ceiling. The methanol fuel was used as a model fire source giving 2.2 and 3.4 kW, with changing the slope angle of stairway adopting of 15, 25, 35, and 45 deg. Based on the experimental data, excess temperature and velocity along the sloped stairway ceiling were examined which are usefully applicable to estimate the activating conditions of heat detector and sprinkler head mounted on the sloped ceiling. Excess temperature in upper exit of the sloped stairway was also examined to analyze the soffit which delays the smoke diffusion. The result shows that the activating conditions of heat detector and sprinkler in the sloped stairway ceiling have to be considered differently in a point of about 30 deg.

Key words: Sloped ceiling(기울어진 천장), Underground fire(지하화재), Heat detector(화재감지기), Soffit(차단막), Smoke diffusion(연기확산)

기 호 설 명

그리스 문자

g : 중력 가속도 [m/s^2]
 H : 화원에서 천장 높이 [m]
 r : 천장을 따라 화원 중심까지 거리 [m]
 T : 가스온도 [K]
 ΔT : 연층의 초과온도 [K]
 v : 연기속도 [m/s]

α : 실험상수 또는 Froude 수
 θ : 계단 기울기 각 [$^\circ$]

하첨자

∞ : 대기상태

1. 서 론

건물 내에서 화재발생시 이를 초기에 감지하고 연기 및 유독가스의 흐름을 효율적으로 제어한다

[†] Corresponding author

Tel.: +82-43-841-5280; fax: +82-43-841-5280

E-mail address: cfdjy@korea.com

면 인명피해를 줄일 수 있음은 물론이고, 연소가스에 의한 화재영역의 확산을 방지할 수 있기 때문에 그동안 이 분야에 대한 연구는 많은 관심의 대상이 되어 왔다.⁽¹⁻³⁾ 화재가 발생하면 열뿐만 아니라 연소과정에서 많은 연기가 발생하는데, 최근 과학의 발달로 인해 플라스틱 등 석유화학제품, 합성섬유로 된 신건축 자재를 사용함으로써 화재시 발생하는 다량의 연기는 그 독성으로 인하여 질식사과 같은 인명피해를 가져오게 된다. 또한 시계의 불투명성으로 인해 화재진압 활동에도 큰 방해원인이 된다.

건물화재시 이러한 연소가스에 의한 피해를 최소화하고 대피를 용이하게 하기 위하여 소방법규상에도 복도, 계단 및 건물내장재 등에 대한 규제가 따른다. 그러나 현대식 건물은 미적 감각 및 쾌적성 등을 염두에 둔 설계가 주류를 이루고 있어 독특한 형태의 공간에 대한 화재방재를 위해 종래의 방재방법이나 소방법규상의 지침만으로는 해결할 수 없는 면이 많다. 최근 일본의 신공항 설계에 있어서도 방화공학을 이용한 연기강하 및 확산시간의 분석에 의하여 허용 대피시간을 설정하고 구역에 따라 소방법규와 건축 방재 지침을 병행하였다고 한다. 국내에서도 마찬가지로 건축물 내의 화재안전 설비는 소방법령(영29~32조) 및 건축법령(영34~64조) 중의 관계규정을 준수하는 선에서 설치되고 있으나, 화재감지기나 스프링클러 설비와 같은 것은 오래 전부터 설계자나 건축가의 판단 또는 의지에 따라 법률적 한계를 넘어 확대, 설치하는 것이 예사롭게 되어 왔다. 이처럼 화재현상에 관한 기본 개념과 설비방식에 대한 체계적인 보급이 제대로 되지 않아 구성과 설계에서부터 오류를 범할 개연성이 있다.

특히 화재에 대한 실험연구는 실제 화재로 발생될 수 있는 연기거동과 화재성장을 관찰하고 측정함으로써 복잡한 화재의 물리적 현상을 이해하고 제어할 수 있는 좋은 가이드를 제공할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 계단통로로 연결되어 있는 밀폐된 지하공간에서 화재가 발생하였을 때 천장 및 계단을 통한 연기의 확산 및 거동, 그리고 열 분포에 대한 실험연구를 수행함으로써 화재감지기 및 스프링클러 시스템의 적절한 설치 및 조건을 유도하고 새로운 건축물 설계시 또는 기존 건물의 방재계획 방향설정에 기여할 수 있을 것으로 사료된다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

계단으로 연결되어 있는 밀폐된 지하공간의 저층에서 화재발생시 상부층으로 확산되는 연기거동 및 열 분포를 조사하기 위한 약 1/9의 축소 화재실험 장치를 구성하였다. Fig. 1은 본 연구에서 수행된 계단 통로에 대한 실험의 기하학적 모양과 열전대 및 속도측정 위치를 보여주고 있다. 계단 통로는 입구와 출구의 폭과 높이가 30 cm×30 cm이고 길이는 177 cm이며 화재발생 공간은 가로×세로×높이가 각각 30 cm×24 cm×50 cm이며 바닥의 한쪽 면에는 화원의 원활한 연소를 위하여 가로와 세로 16 cm×13 cm의 개구부가 존재하도록 하였다. 그리고 계단의 상부 출구와 연결되어 있는 2층 공간은 가로×세로×높이가 각각 90 cm×235 cm×120 cm인 밀폐공간으로 구성되었으며 모든 벽면은 0.9 cm 두께의 아크릴판을 사용하였다. 계단 기울기 각(θ)은 15, 25, 35, 45°로 변화도록 하였고 화원의 소스는 정사각형 풀(pool)에 담겨 있는 메탄올을 사용하였다. 저층에서 발생된 화재의 연소가스가 계단천장을 통해 상부층으로 확산되는 연기의 속도와 온도를 측정하기 위해 천장에서 2 cm 떨어진 위치에, 그리고 계단 하단부에서 50 cm 간격으로 세 개(a, b, c)의

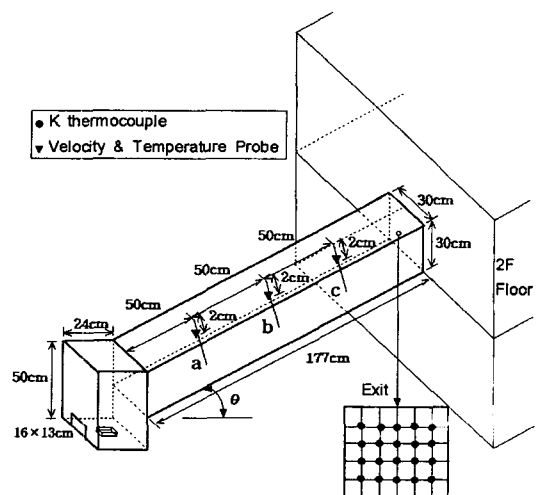


Fig. 1 Experimental arrangements and configuration.

probe를 설치하였다. 속도 센서는 전압차를 이용한 데이터 변환 장치(National Instruments사의 HONFIELD Analog 풍속, 풍온 다점신호 변환기, 모델명: GeT-160N)를 사용하여 속도를 측정하였으며(정밀도: 풍속 \pm 5%, 풍온 \pm 0.5 $^{\circ}$ C), 또한 계단통로의 기울기에 따라 상부층으로 확산되는 연기거동을 살펴보기 위해 계단 통로의 상부 출구 쪽에는 균일한 그물망 형태로 K-type 열전대 20개를 배열하여 온도를 측정하도록 구성하였다.

2.2 화 원

화원의 소스는 정사각형 풀(pool) 사이즈로 한 변의 길이가 각각 8cm(화재 크기 2.2kW)와 10cm(화재 크기 3.4kW)의 두 가지를 사용하였으며, 용기의 재질은 두께 2mm의 철판을 사용하였다. 연료는 순도 99%의 메탄올(CH₃OH)을 사용하였으며, 이때 각각의 발열량(HRR)은 로드 셀 계측기(load cell indicator)를 사용하여 메탄올(연소열=2000 kJ/kg)의 연소량(=0.017 kg/m²s)이 줄어드는 양을 측정해 얻어진 값들이다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 계단 기울기에 따른 연층의 상승속도

Fig. 2는 화재가 저층에서 발생하여 연소가스가 계단 천장을 따라 상부층으로 확산될 때 계단 기울기와 발열량에 따른 연기의 최대 상승속도와

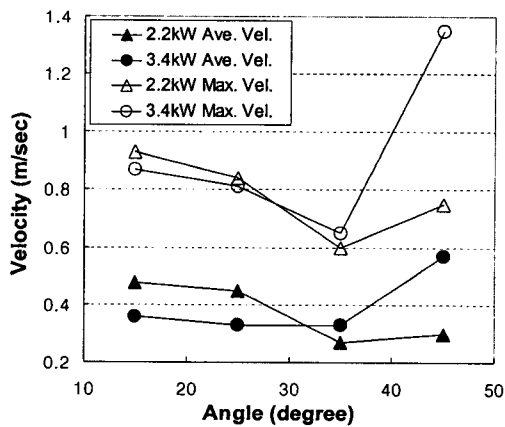


Fig. 2 Measured maximum and time-average flow velocity as function of slope angles.

평균 속도 비교를 나타낸다(오차 \pm 3.3%). 여기서 평균 속도는 화재현상이 정상상태에 도달했을 때의 시간 평균을 의미한다. 그림에 나타나는 바와 같이 전체적으로 계단 기울기가 15 $^{\circ}$ 에서 35 $^{\circ}$ 까지는 연층의 상승속도가 감소하고 있고 계단 기울기가 45 $^{\circ}$ 일 때 연층의 상승속도는 증가하고 있음을 볼 수 있다. 이것은 화염으로부터 발생된 연소가스는 부력에 의해 상승하고 천장제트를 형성하게 된다. 이때 계단 기울기가 35 $^{\circ}$ 까지는 천장의 기울기가 커짐에 따라 연소가스가 천장에 부딪히는 면적이 점차 증가하게 되어 마찰과 열전달에 의한 부력손실이 발생되어 천장제트의 모멘텀이 약해지고 상승속도가 약해지기 때문이다. 또한 계단 기울기가 45 $^{\circ}$ 가 되어서는 상대적으로 부력손실량에 비해 계단 통로의 압력차에 의한 연돌효과(stack effect) 영향이 커져 천장제트의 운동량이 커지게 되고 따라서 상승속도가 증가하기 때문인 것으로 사료된다. 이러한 현상은 발열량이 큰 화재일수록 연돌효과에 더욱 민감하게 반응하고 있음을 볼 수 있다. 특히 화재감지기와 스프링클러 시스템에 중요한 최대 연층 상승속도에 대한 측정값의 비교는 위와 같은 현상이 더욱 잘 반영되고 있음을 그래프에서 확인할 수 있다. 또한 연층의 평균 속도와 최대 속도는 약 50% 이상의 차이를 나타내며 반응하고 있음을 그림에서 볼 수 있다.

3.2 계단 기울기에 따른 연층의 온도분포

Fig. 3은 화재가 저층에서 발생하여 연소가스가

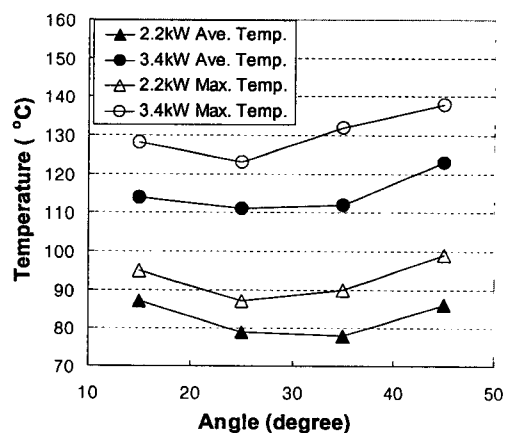


Fig. 3 Measured maximum and time-average temperature as function of slope angles.

계단 천장을 따라 상부층으로 확산될 때 계단 기울기와 발열량에 따른 연층의 최대 온도와 평균 온도에 대한 그래프를 보여준다(오차±1.5%). 연층의 평균 온도와 최대 온도 측정값의 비교는 발열량 2.2kW 화재에서는 약 9%, 그리고 발열량 3.4kW 화재에서는 약 11%의 차이를 나타내며 반응하고 있음을 확인할 수 있다. 그래프에 나타나는 바와 같이 전체적으로 계단 기울기가 30°를 기점으로 하여 연층의 온도가 감소추세에서 증가추세로 전환하고 있음을 볼 수 있다. 이것은 30° 이전의 계단 기울기에서는 압력차에 의해 발생하는 연돌효과의 영향이 작고 천장 기울기가 증가

함에 따라 천장제트로 형성되는 연층의 두께가 두꺼워지게 되고 열전달면적의 증가로 열손실이 커지게 되어 연층의 온도가 감소하기 때문이다. 그러나 계단 기울기가 30° 이상이 되면 연돌효과의 영향이 커져 계단 기울기가 증가함에 따라 천장에 형성되는 연층의 모멘텀이 커지고 두께는 얇아지게 되어 천장 근처에서 연기의 온도는 증가하기 때문인 것으로 사료된다. 따라서 밀폐된 지하공간에서 계단 천장에 화재감지거나 스프링클러 시스템의 설치시 계단 기울기 30°를 기준하여 작동조건이 고려되어야 할 것이다.

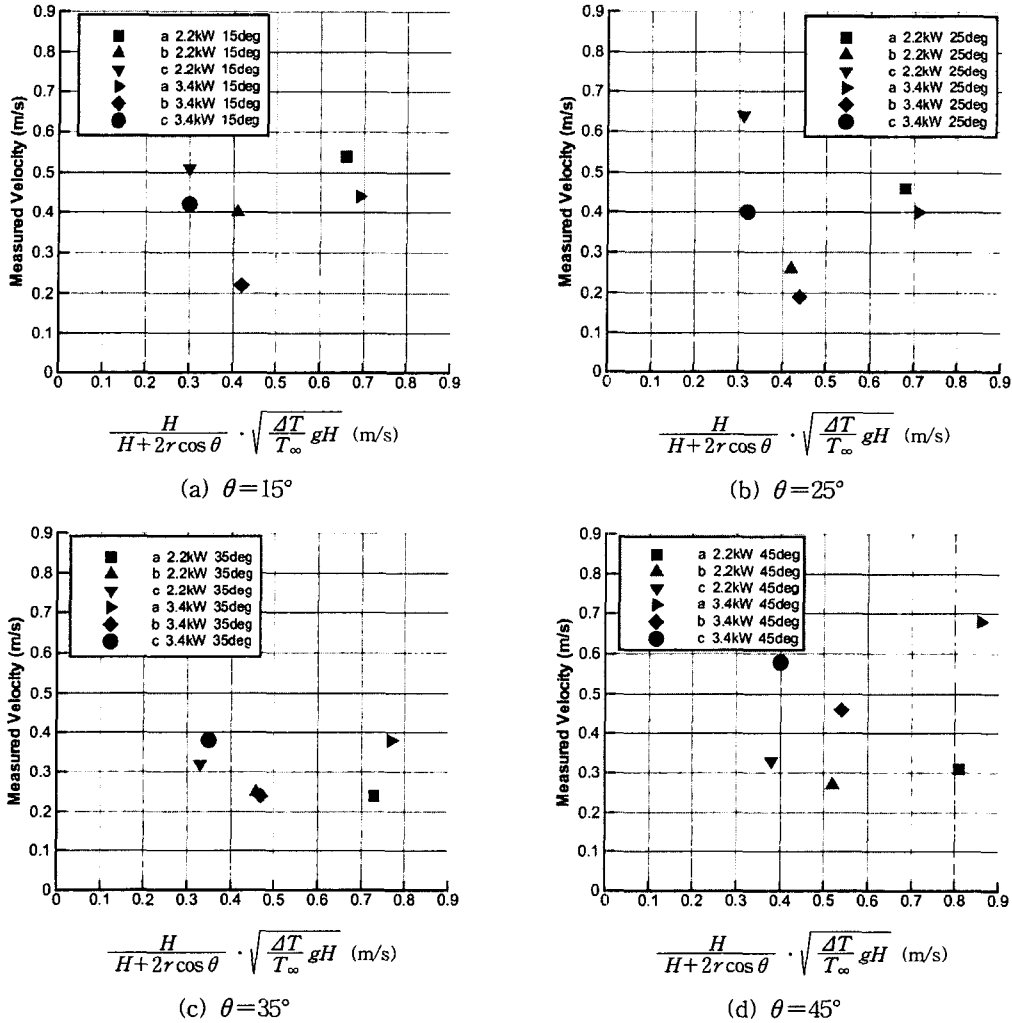


Fig. 4 Correlation between measured velocity and temperature based velocity with location modification at slope angles of 15, 25, 35 and 45 deg.

3.3 Osami 모델과의 비교

Alpert⁽⁴⁾와 Heskestad et al.⁽⁵⁾은 화재발생시 천장제트에서 가스의 온도와 속도에 대한 상관성을 기초로 적용하기 쉬운 정량적인 연기모델을 제안한 바 있다. 그러나 이러한 모델은 기울어진 천장에서 형성되는 천장제트에는 적용하기 어려운 단점이 있어 화재감지기나 스프링클러 시스템의 설치시에 문제가 있음을 축소실험과 이론연구를 통하여 Osami et al.⁽⁶⁾이 밝힌 바 있다. 그러나 밀폐된 지하공간에서 화재발생시 기울어진 계단 천장을 통하여 상층부로 확산되는 천장제트의 경우 Osami et al.⁽⁶⁾이 제안한 모델을 적용하기에는 연기거동의 물리적 현상이 다르게 나타날 수 있다.

일반적으로 기울어진 천장 아래서 화재가 발생되었을 경우 열전달면적의 증가로 열손실이 커지게 되고 연기는 기울어진 천장을 따라 천장제트

를 형성하게 된다. 이때 기울어진 천장을 따라 상승하는 연기의 이동속도는 Osami et al.⁽⁶⁾가 제안한 다음 식으로부터 구해질 수 있다.

$$v = \alpha \frac{H}{H+2r\cos\theta} \sqrt{\frac{\Delta T}{T_\infty} gH} \quad (1)$$

여기서, α 는 Froude 수로 천장 기울기에 독립적으로 $\alpha \approx 3/4 \sim 7/8$ 의 값을 나타내며, $\Delta T/T_\infty$ 는 연기층의 무차원 온도, H 는 화원에서 천장 높이, θ 는 천장 기울기, 그리고 r 은 화원 중심에서 유동방향 거리를 나타낸다. 식(1)에서 위치수정항(location modification term) $H/(H+2r\cos\theta)$ 과 유동속도에 기초한 온도항(temperature based flow velocity), $\sqrt{(\Delta T/T_\infty)gH}$ 의 상관성(correlation)을 통하여 천장에 설치되어 있는 화재감지기의

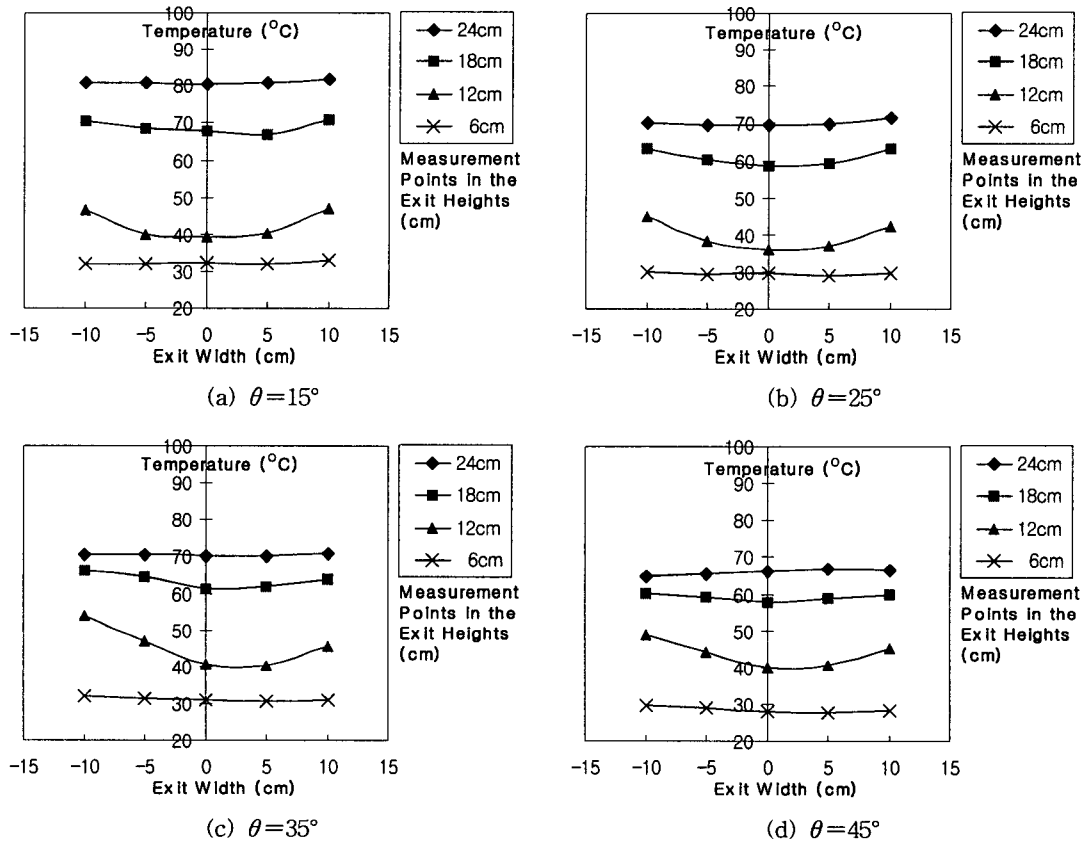


Fig. 5 Measured temperature distribution in the upper exit for fire size 2.2 kW on the slope angle 15°, 25°, 35° and 45°.

반응시간과 스프링클러의 작동시간을 예측할 수 있다. 그러나 식(1)은 오픈된 공간에서 천장을 따라 이동하는 연층의 속도만을 예측할 수 있으며, 지하공간과 같이 밀폐된 계단 천장을 따라 이동하는 경우는 계단 통로의 연돌효과에 의해 연층의 속도를 적절히 예측하기에는 어려움이 있다. Fig. 4의 (a)~(d)는 각각 계단 기울기에 따른 천장 근처에서 측정된 속도와 식(1)에 의해 계산된 값과의 상관관계를 나타낸다(오차±3.3%). 그림에서 볼 수 있듯이 Osami et al.⁽⁶⁾가 제안한 식(1)에서 Froude 수 $\alpha \approx 3/4 \sim 7/8$ 의 값이 전체적으로 잘 맞지 않고 있음을 확인할 수 있다. 따라서 천장에 화재감지기나 스프링클러 시스템을 설치시 천장을 따라 이동하는 연기의 속도를 간편하게 예측할 수 있는 식(1)을 적용할 경우 밀폐된 지하공간이고 기울어진 계단 천장에서는 연돌효과가 추가된 좀더 넓은 범위의 Froude 수($\alpha \approx 1/2 \sim$

3/2)를 적용할 필요가 있다.

3.4 계단 기울기에 따른 상부 출구에서 연층의 온도분포

Fig. 5와 Fig. 6은 계단 기울기에 따른 상부 출구에서 연층의 온도분포 비교를 나타낸다(오차±1.8%). 그래프에서 볼 수 있듯이 계단 기울기가 증가할수록 출구 밀면에서 6cm와 12cm인 지점의 온도분포는 거의 변화가 없지만 출구 중간부분에서 위쪽부분인 18cm와 24cm인 지점의 온도분포는 감소하고 있음을 확인할 수 있다. 이것은 계단 통로의 상부 출구에서는 중립축을 기준으로 위쪽에서는 연소가스가 배출되고 아래에서는 상부층의 공기가 하부층으로 유입되는 양방향 유동이 발생하게 되는데, 이때 계단 기울기가 증가할수록 압력차가 커져 연돌효과의 영향이 크게

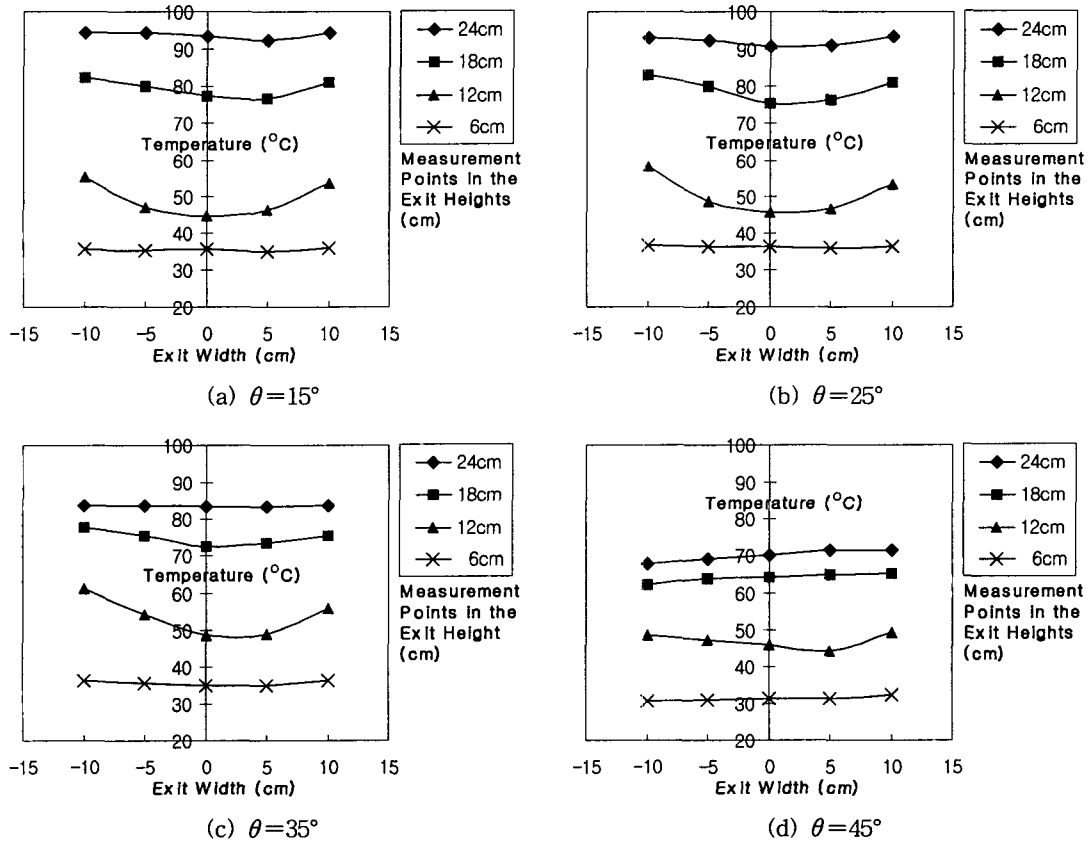


Fig. 6 Measured temperature distribution in the upper exit for fire size 3.4kW on the slope angle 15°. 25°. 35° and 45°.

작용함으로써 출구 위쪽부분에서 연소가스가 배출되는 유로가 좁아지기 때문이다. 즉, 계단 기울기가 45° 이상이 되면 상부층과 연결되어 있는 출구의 위쪽에서 배출되는 연층의 두께가 급격히 얇아지는 현상이 발생한다. 따라서 상부층으로 연기의 확산을 지연시키기 위해 출구의 위쪽 면에 차단막(soffit)을 설치하는 경우 그 크기를 임의적으로 설정할 것이 아니라 계단과 천장의 기울기에 따라 차단막 크기를 조정할 필요가 있다.

4. 결 론

계단 통로로 연결되어 있는 밀폐된 지하공간에서의 화재실험 결과 계단 기울기가 30° 이하에서는 연층의 상승속도와 온도가 완만한 하강곡선을 유지하다가 30° 이상이 되면서 기울어진 천장을 따라 상부층으로 이동하는 천장제트가 강한 연돌효과(stack effect)에 의해 두께가 얇아지고 연층의 상승속도와 온도가 급격히 상승함을 확인할 수 있었다. 따라서 밀폐된 지하공간에서 계단 천장에 화재감지기나 스프링클러 시스템의 설치시 계단 기울기 30°를 기준하여 방재시스템의 작동조건이 조정되어야 할 것이다.

일반적으로 기울어진 천장 아래서 화재발생시 천장제트 속도를 간편하게 예측할 수 있는 Osami et al.⁽⁶⁾이 제안한 식을 본 연구에서 수행된 밀폐된 지하공간 화재 실험 데이터들과 비교한 결과 식에서 연돌효과가 추가된 좀더 넓은 범위의 Froude 수($\alpha \approx 1/2 \sim 3/2$)를 얻을 수 있었다. 따라서 향후 다양한 케이스의 실험모델을 수행하여 밀폐된 지하공간 화재에 대한 Froude 수를 정립할 필요가 있을 것이다.

밀폐된 지하공간에서 화재발생시 기울어진 계단 통로에 대한 방재설비는 이러한 물리적 현상들을 이해하고 적절한 화재감지기나 스프링클러 시스템의 위치나 작동조건이 고려되어야 할 것이

며, 또한 상부층으로 연층확산을 지연시키기 위한 차단막의 설치도 계단 천장의 기울기에 따라 그 크기를 조정할 수 있도록 유도되어야 할 것이다.

후 기

이 논문은 2002년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음(KRF-2002-037-D00014).

참고문헌

1. Steckler, K. D., Quintiere, J. G. and Rinkinen, W. J., 1982, Flow induced by fire in a compartment, Nineteenth Symposium (Int.) on Combustion, The Combustion Institute, pp. 913-920.
2. Quintiere, J. G., 1984, A Perspective on compartment fire growth, Combustion Sci. and Tech., Vol. 39, pp. 11-54.
3. Kerrison, L., Galea, E. R., Hoffmann, N. and Patel, M. K., 1994, A comparison of a FLOW3D based fire field model with experimental room fire data, Fire Safety J., Vol. 23, pp. 387-411.
4. Alpert, R. L., 1972, Calculation of response time of ceiling-mounted fire detectors, Fire Tech., Vol. 8, pp. 181-195.
5. Heskestad, G. and Delichatsios, M. A., 1978, The initial convective flow in fire, 17th Int. Symposium on Combustion, Combustion Institute, Pittsburgh.
6. Osami, S., Takashi, H., Naoto, N. and Ayako, I., 2000, Flow behavior under sloped ceiling, Fifteenth Meeting of the UJNR Panel on Fire Research and Safety, Vol. 2, NISTIR 6588.